ANALISIS RISIKO *DERAILMENT* PADA KERETA API BERKECEPATAN TINGGI

Rahmi Fajriati
MSTT, DTSL – Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta
rahmifajriati@gmail.com

Suryo Hapsoro Tri Utomo
MSTT, DTSL – Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta
s_hapsoro@yahoo.com

Imam Muthohar
MSTT, DTSL – Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta
imam.muthohar@ugm.ac.id

Latif Budi Suparma
MSTT, DTSL – Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta
lbsuparma@ugm.ac.id

Abstract

Based on online news sources from extraordinary incidents of railways performance in Indonesia, the accident that mostly occurred was derailment which is 89,29%. Ministry of Transportation has identified that the most significant cause of derailment is high speed, and today Indonesia is entering a new phase in the construction of high speed railways. This study aims to analyze high speed railways derailment risk by using Nadal's Formula. The data used are characteristics of CR400AF Fuxing Train. With an average vertical load of 363,436 kN and a lateral force of 202,353 kN, it obtained a Y/Q ratio average of 0,557. This value is smaller than Nadal value which is 1,6. The analysis results show that the high speed railways CR400AF fuxing train is safe from derailment risk.

Keywords: *high speed, CR400AF Fuxing Train, derailment*

Abstrak

Berdasarkan sumber berita daring dari kategori peristiwa luar biasa hebat dalam penyelenggaraan perkeretaapian di Indonesia, kasus kecelakaan yang paling banyak terjadi adalah anjlokan atau *derailment* yaitu 89,29%. Kementerian Perhubungan mengidentifikasi bahwa kecepatan yang tinggi adalah penyebab terjadinya anjlokan yang paling signifikan, dan saat ini Indonesia sedang memasuki babak baru dalam pembangunan kereta api berkecepatan tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko *derailment* kereta api berkecepatan tinggi dengan menggunakan *Nadal's Formula*. Data yang digunakan adalah karakteristik kereta cepat CR400AF *Fuxing Train*. Dengan rata-rata beban vertikal 363,436 kN dan gaya lateral sebesar 202,353 kN, didapatkan rata-rata rasio Y/Q yaitu 0,557. Nilai tersebut lebih kecil dari nilai Nadal yaitu 1,6. Hasil analisis menunjukan bahwa kereta api berkecepatan tinggi CR400AF *fuxing train* aman dari risiko *derailment*.

Kata Kunci: kecepatan tinggi, CR400AF *Fuxing Train*, *derailment*

PENDAHULUAN

Saat ini Indonesia sedang memasuki babak baru dalam pembangunan kereta api berkecepatan tinggi. Pembangunan ini diselenggarakan oleh PT KCIC (Kereta Cepat Indonesia China). Perusahaan hasil konsorsium pihak Indonesia yaitu PT. Pilar Sinergi BUMN Indonesia dan pihak China yaitu Beijing Yawan HSR Co. Ltd ini merencanakan menggunakan kereta jenis CR400AF *fuxing train* yang dapat melaju hingga 350 km/jam. Kecepatan tersebut hampir tiga kali lebih cepat dibandingkan dengan kereta api yang ada di

Indonesia. Kementerian Perhubungan mengidentifikasi bahwa kecepatan yang tinggi adalah penyebab terjadinya anjlokan yang paling signifikan (Sulistiyawan, 2013), oleh karena itu perlu adanya penelitian terkait analisis anjlokan/*derailment* kereta api berkecepatan tinggi. Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya terkait *derailment.*

1. Anjlokan atau *derailment* dapat disebabkan oleh dua macam gaya, yaitu gaya yang menimbulkan momen guling sehingga terjadi penggulingan, dan gaya ke atas yang menungkit roda sehingga roda perlahan keluar rel dan anjlok (Atmadja & Fitriadi, 2001).
2. Dari hasil analisis laporan investigasi *derailment* kereta api yang diterbitkan oleh KNKT dan ringkasan data rel kerea api yang diterbitkan oleh Kementerian Perhubungan, didapatkan sebuah penilaian bahwa perlu adanya peningkatan pada program pemeriksaan dan pemantauan, prosedur perawatan dan evaluasi, program penggantian dan pembaruan, program instalasi dan modifikasi, serta pencatatan dan audit. Penelitian ini ingin mengetahui berapa nilai kofisien *derailment* yang mungkin terjadi dengan berdasarkan pada beberapa persamaan teoritis (Sulistiyawan, 2013).
3. Peristiwa luar biasa hebat dalam penyelenggaraan perkeretaapian di Indonesia telah dianalisis oleh Prabowo (2017a), hasilnya 89,29% dari kategori PLH adalah anjlokan. Informasi utama dari sumber data yang akan dijadikan bahan penelitian adalah detail dan penyebab dari suatu kejadian. Seluruh data dianalisis dengan teknik analisis isi.
4. Prabowo (2017b) merancang program komputer perhitungan analisis *derailment,* tujuannya untuk mengetahui nilai keamanan sebuah kereta api yang melalui jalur tertentu, dengan menggunakan program *unity,* didapatkan nilai keausan roda kereta yang masih dalam kondisi aman adalah pada saat nilai sudut *flange*/sayap roda kereta api > 32 derajat.

Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya dalam hal penajaman analisis dimana bukan hanya menganalisis koefisien derailment saja namun juga *flange climbing* pada kereta api dengan kecepatan 300 km/jam. Maksud dari penelitian ini adalah mengetahui apakah kereta api berkecepatan tinggi aman dari risiko derailment dan mengetahui metode analisis risiko *derailment.* Tujuan penelitian ini adalah menganalisis *flange climbing* dan risiko *derailment* pada kereta.

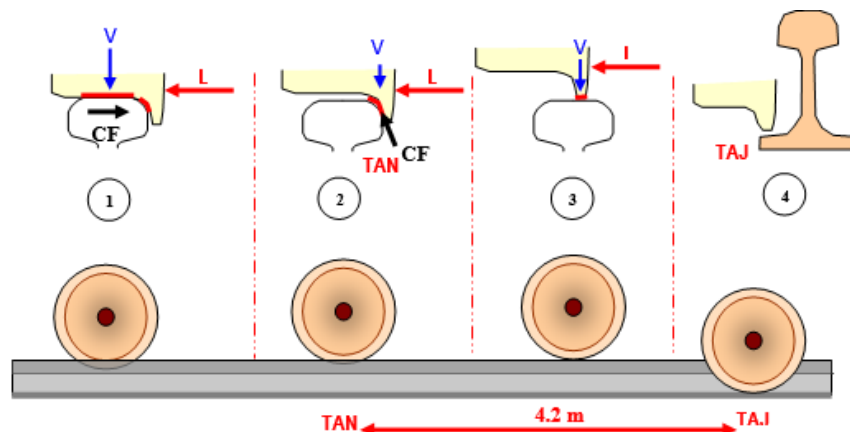
LANDASAN TEORI

Risiko Derailment Pada Kereta Api

Dari berbagai kategori kecelakaan, anjlokan/*derailment* menjadi perhatian utama bagi para *engineer*. Menurut Mundrey (2010) terdapat dua kategori *derailments*:

1. *Derailment* secara tiba-tiba dengan set roda melompat rel. anjlokan yang seperti itu menunjukan bahwa gaya *derailment* cukup besar untuk mendorong roda keluar dari rel secara tiba-tiba.
2. *Derailment* oleh *flange climbing* yaitu naiknya roda di rel secara relatif bertahap. Hal itu menunjukkan bahwa gaya *derailment* cukup kuat untuk melebihi kekuatan stabilisasi normal, namun tidak cukup untuk menyebabkan anjlokan tiba-tiba. *Derailment* yang disebabkan oleh *flange climbing* adalah yang paling banyak terjadi.

Proses anjlokanan disebabkan oleh adanya gaya lateral (Y) roda yang lebih besar dibandingkan dengan gaya vertikal roda (Q). Tahapan dari proses ini terjadi dalam empat fase sebagai berikut (Mundrey, 2010):

1. Pada fase pertama gaya lateral pada roda mendorong flens roda kearah samping sehingga bergesekan dengan sisi permukaan samping kepala rel. Hal ini menimbulkan terjadinya gaya kontak flens roda (CF) yang berlawanan dengan arah gaya lateral flens roda.
2. Meningkatnya durasi dan gaya tekan lateral flens roda yang bergesekan dengan permukaan samping kepala rel menyebabkan berubahnya gaya CF pada arah tangensial antara kontak flens roda dengan kepala rel dan kontak gaya vertikal roda yang berpindah ke arah flens roda, membantu flens roda untuk naik ke atas kepala rel dan menyebabkan nilai gaya vertikal roda menjadi lebih kecil dibandingkan gaya lateral roda.
3. Pada fase ketiga terjadi kombinasi antara gaya lateral pada flens roda dan gaya rambat lateral roda terhadap gaya vertikal roda menyebabkan naiknya flens roda di atas kepala rel dengan berat roda yang tertumpu pada flens roda.
4. Gaya lateral roda pada akhirnya mendorong roda keluar rel dimana jarak goresan yang terjadi di atas kepala rel karena naiknya flens roda ke atas kepala rel secara bertahap umumnya berjarak lebih dari 30 cm. Ilustrasi keempat fase ditampilkan pada Gambar 1.

Gambar 1. Fase terjadinya *flange climbing* hingga *derailment*
Sumber: *Mundrey, 2010.*

Derailment terjadi apabila Y/Q rasio meningkat akibat meningkatnya gaya lateral (Y) atau beban gandar yang rendah (Q), pada kasus tersebut *flange* roda akan menanjak sangat tinggi pada rel sehingga dapat mengakibatkan *derailment*. Jika *flange* atau pelumas rel digunakan, situasinya akan jauh lebih baik karena lebih sedikit gesekan. Jika ingin menghidari terjadinya *derailment* pada kereta maka nilai Y/Q harus harus memenuhi Persamaan (1).

$$Y/Q < 1{,}2 \tag{1}$$

Kereta dikatakan aman dari risiko anjlokan apabila perbandingan nilai gaya lateral dengan beban vertikal $< 1{,}2$ (Esveld, 2001). Di beberapa negara yang telah memiliki standar teknis kereta cepat menetapkan batas maksimum Y/Q berbeda-beda, disesuaikan dengan nilai *Nadal's Formula*.

Total Beban Gandar Vertikal

Gaya vertikal adalah gaya yang menyebabkan terjadinya defleksi vertikal. Secara global, besarnya gaya vertikal dipengaruhi oleh beban lokomotif, beban kereta atau gerbong, dan faktor dinamis. Menurut Esveld (2001) total beban gandar vertical (Q) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{tot} = (Q_{stat} + Q_{centr} + Q_{wind}) + Q_{dyn} \quad (2)$$

$$Q_{centr} + Q_{wind} = G\,\frac{p_c h_d}{s^2} - H_w\,\frac{p_w}{s} \quad (3)$$

Dengan ketentuan h_d sebagai berikut:

$$h_d = \frac{sv^2}{gR} - h \quad (4)$$

Dengan:

G = Berat beban gandar (kN)
H_w = Gaya angin (kN)
s = Lebar rel (mm)
v = Kecepatan (km/jam)
g = Percepatan gravitasi ($m/detik^2$)
R = Radius tikungan (m)
h = Kemiringan (mm)
p_c = Jarak titik berat kereta (m)
p_w = Resultan gaya angin (m)

Beban statis didapatkan dari beban gandar kereta (Q_{stat}), akibat dari beban dinamis kereta api maka timbul faktor dinamis, sehingga beban statis mentransformasi ke beban dinamis (Q_{dyn}) dengan menggunakan Persamaan Eisenmann berikut:

$$DAF = 1 + t\,.\varphi\,(1 + (V-60)/140) \quad (5)$$

Dengan:

DAF = faktor dinamis,
t = koefisen standar deviasi, untuk analisis keamanan dipilih nilai sebesar 3,
φ = kondisi jalur kereta, untuk kondisi rel normal digunakan nilai 0,2, dan
V = kecepatan kereta api (km/jam).

Kemudian didapatkan beban dinamis dari persamaan berikut (Susanto & Muthohar, 2015):

$$Pd = Ps \times DAF \quad (6)$$

Dengan:

Pd = Gaya dinamis (ton),
Ps = Gaya statis (ton), dan
DAF = Faktor dinamis.

Gaya Lateral Kereta

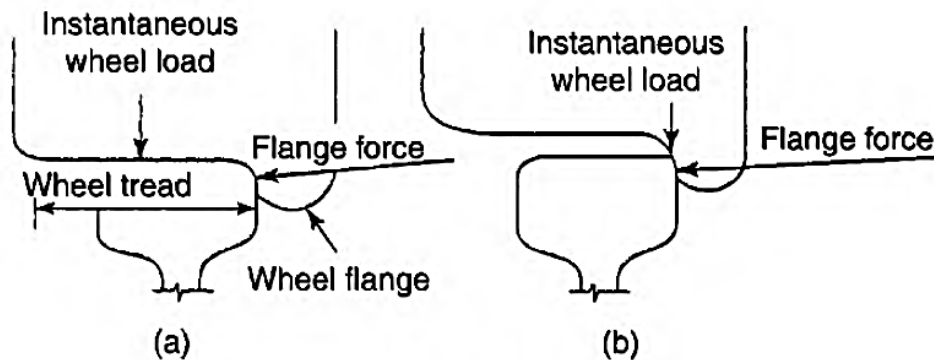
Gaya ini terjadi akibat adanya gaya sentrifugal yang terjadi saat rangkaian kereta api berada di lengkung horizontal, gerakan rangkaian ular (*snake motion*) dan ketidakrataan geometrik jalan rel yang bekerja pada titik yang sama dengan gaya vertikal (Muthohar dan Susanto, 2015). Gaya ini dapat menyebabkan tercabutnya penambat akibat gaya angkat (*uplift force*), pergeseran pelat andas dan memungkinkan terjadinya *derailment.* Total gaya horizontal lateral ($Y_{e\,max}$) pada kereta dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Esveld, 2001):

$$Y_{e\,max} = G\,\frac{h_d}{s} - H_w \quad (7)$$

Dengan:

G	= Berat beban gandar	(kN)
h_d	= Kemiringan	(mm)
H_w	= Gaya angin	(kN)
s	= Lebar rel	(mm)

Flange Climbing

Flange climbing adalah salah satu penyebab *derailment*, dimana roda kereta bergerak keluar dari jalur rel akibat gaya lateral yang terjadi. Ketika beban roda sesaat (*instantaneous wheel load*) lebih besar dari beban roda normal disebut *on-loading* (a). Jika kurang, disebut *off-loading* (b). Pada kontak flens sesaat, jika terjadi disposisi pada flens (gaya *derailment*) dan beban roda sesaat (gaya penstabil) tidak sesuai, maka flens roda akan bergeser ke atas tepi rel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Kondisi *flange climbing*
Sumber: *Mundrey, 2010.*

Flange climbing paling banyak dianggap sebagai penyebab *derailment*, untuk itu perlu menentukan *flange climbing* dengan menggunakan nilai Y dan Q yang sama yang dipengaruhi oleh sudut kemiringan rel, seperti pada Persamaan (8) dan (9).

$$N = Y \sin\beta + Q \cos\beta \quad (8)$$

$$S = Q \sin\beta - Y \cos\beta \quad (9)$$

Dengan:
N = Gaya Normal (kN)
S = Gaya Tangensial (kN)
β = Sudut Flens

Menurut Esveld (2001) *flange climbing* dapat dihindari jika Persamaan (10) dapat terpenuhi.

$$f\,N \leq S \qquad (10)$$

dimana *f* adalah koefisien gesek. Untuk alasan keamanan, sudut kemiringan (β) yang sering digunakan adalah 60°, dengan nilai sudut tersebut nilai *f* yang digunakan adalah 0,15. (Esveld, 2001).

Nadal's Formula

Nadal's Formula, disebut juga koefisien *derailment,* adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui besarnya risiko *derailment*. Nadal's formula juga digunakan untuk memprediksi nilai keamanan roda yang bergerak pada rel terhadap kemungkinan *Flange Climbing*. Pada saat *derailment* baru akan terjadi, dimana roda flens dalam posisi mendaki, dan gaya bekerja pada kontak roda kereta dalam kondisi angularitas positif (Mundrey, 2010). Kondisi ini ditunjukan pada Gambar 3.

Gambar 3. Gaya yang terjadi saat roda kontak dengan rel ketika *derailment* akan terjadi dengan angularitas positif
Sumber: *Mundrey, 2010.*

Dengan:
Y = Gaya lateral (flens)
Q = Beban gandar vertikal
R = Gaya normal dari rel ($Q \cos \beta + Y \sin \beta$)
B = Sudut flens
µR = Koefisien gesek yang bekerja pada kontak flens roda dan rel

Untuk alasan keamanan, gaya *derailment* tidak boleh lebih besar dari gaya stabilitasnya. Mengantispasi gaya yang bekerja sepanjang slope flens atau sudut β horizontal, kondisi ini digambarkan pada Persamaan (11) berikut:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan\beta - \mu}{1 + \mu \tan\beta} \qquad (11)$$

Pada Persamaan (11), rumus *Nadal's Formula* berada pada ruas kanan, sedangkan ruas kiri adalah perbandingan nilai gaya lateral kereta terhadap nilai beban vertikal. Menentukan nilai nadal dapat memprediksi risiko *derailment* suatu kereta (Mundrey, 2010).

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur. Diperlukan data sekunder untuk melengkapi variabel dalam Nadal's Formula. Data tersebut diperoleh dari PT. Wijaya Karya (Persero) Tbk. Data tersebut berupa,

1. Karakteristik kereta CR400AF *fuxing train* yang meliputi jarak titik berat kereta terhadap titik nol (centroid),
2. Referensi sudut flens yang digunakan,
3. Berat beban gandar kereta,
4. dan lebar rel kereta.

Data pendukung lain didapatkan dari beberapa referensi, seperti:

1. Radius kereta api berkecepatan tinggi,
2. Gaya angin,
3. Resultan gaya angin,
4. dan koefisien gesek antara flens roda dan kepala rel.

Kemudian analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah,

1. Analisis total beban gandar vertikal pada masing-masing kereta,
2. Analisis gaya lateral pada masing-masing kereta,
3. Dari hasil analisis beban vertikal dan gaya lateral kemudian dianalisis Y/Q rasio dan *flange climbing*,
4. Analisis nilai Nadal guna mengetahui risiko *derailment* kereta.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari proses pengumpulan data didapatkan informasi karakteristik kereta CR400AF dan perencanaan rel yang ditunjukan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Karakteristik Kereta CR400AF *Fuxing Train*

Kecepatan Rata-Rata	300 km/jam
Kecepatan Maksimum	350 km/jam
Tinggi Kereta	4050 mm
Lebar Rel	1435 mm
Jarak Titik Kontak Roda	1500 mm
Beban Gandar	17 Ton

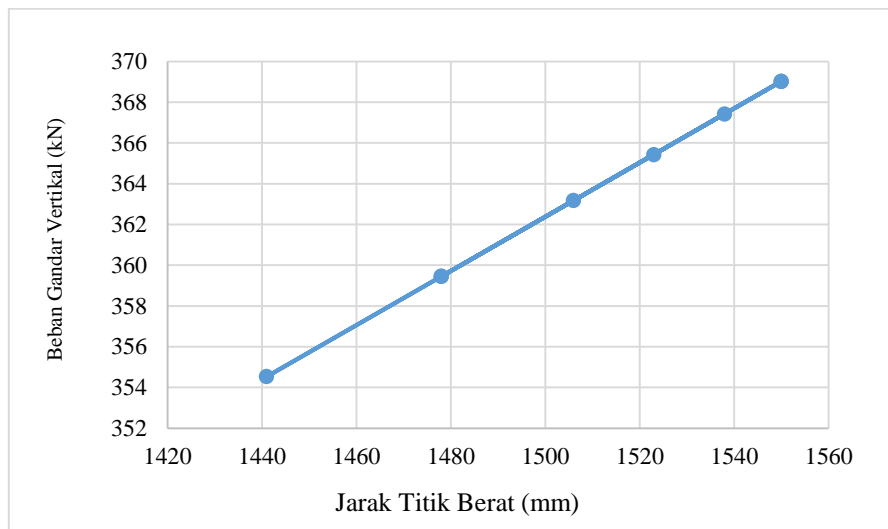
Sumber: *CSR Qingdao Sifang, 2018.*

Analisis Total Beban Vertikal

Berdasarkan Persamaan (2) diperlukan nilai beban angin dan resultan gaya angin untuk menganalisis total beban gandar vertikal. Dalam PM 60 Tahun 2012, beban angin yang digunakan adalah 3 kN/m^2 dan resultan gaya angin dapat diasumsikan terletak pada bagian tengah badan kereta (Sanchez, 2014), sedangkan jari-jari lengkung yang digunakan adalah 7080 m (Fajriati et al, 2020). Dalam satu rangkaian kereta CR400AF memiliki jarak titik berat yang berbeda-beda.

Tabel 2. Beban vertikal masing-masing kereta

Car No.	P_c (mm)	Q (kN)
1	1538	367,423
2	1478	359,450
3	1550	369,018
4	1441	354,532
5	1506	363,170
6	1550	369,018
7	1478	359,450
8	1523	365,410

Nilai beban vertikal tertinggi adalah pada *Car* No. 3 dan *Car* No. 6 yaitu 369,018 kN dan nilai beban vertikal terendah adalah pada *Car* No. 4 yaitu 354,532 kN. Hasil analisis beban vertikal tiap kereta dimasukan dalam grafik pada Gambar 4.

Gambar 4. Hubungan titik berat dengan beban gandar vertical

Hubungan yang terjadi antara jarak titik berat adalah berbanding lurus dengan beban gandar vertikal, semakin besar jarak titik berat maka semakin besar beban gandar vertikal.

Analisis Total Gaya Lateral

Untuk semua kereta mendapatkan nilai gaya lateral yang sama karena semua variabel yang digunakan sama yaitu berat beban gandar, kemiringan, gaya angin dan lebar rel. Hasil analisis gaya lateral pada semua kereta adalah 202,353 kN.

Risiko *Derailment*

Hasil analisis risiko anjlokan menunjukan bahwa semua kereta berada dalam kondisi yang aman saat melewati tikungan. Jika dirata-ratakan maka didapatkan nilai Y/Q kereta *fuxing train* CR400AF adalah 0,557, sehingga:

0,557 < 1,2…….(OK)

Hasil analisis risiko *derailment* tiap kereta dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil analisis menunjukan bahwa kereta aman dari risiko *derailment.*

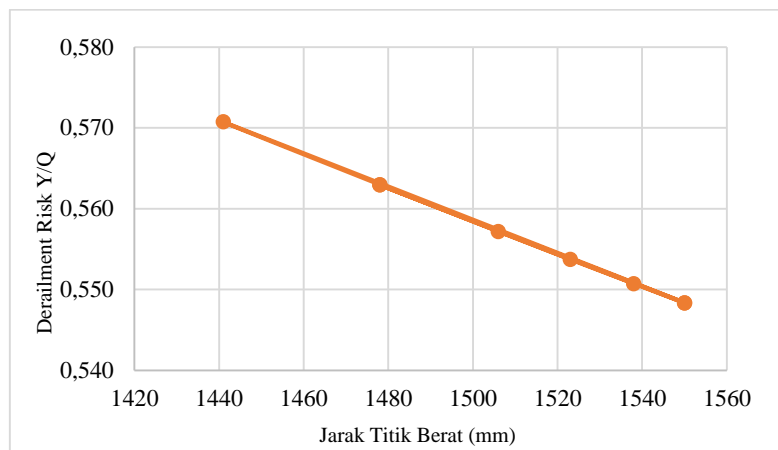
Tabel 3. Nilai *derailment risk* tiap kereta

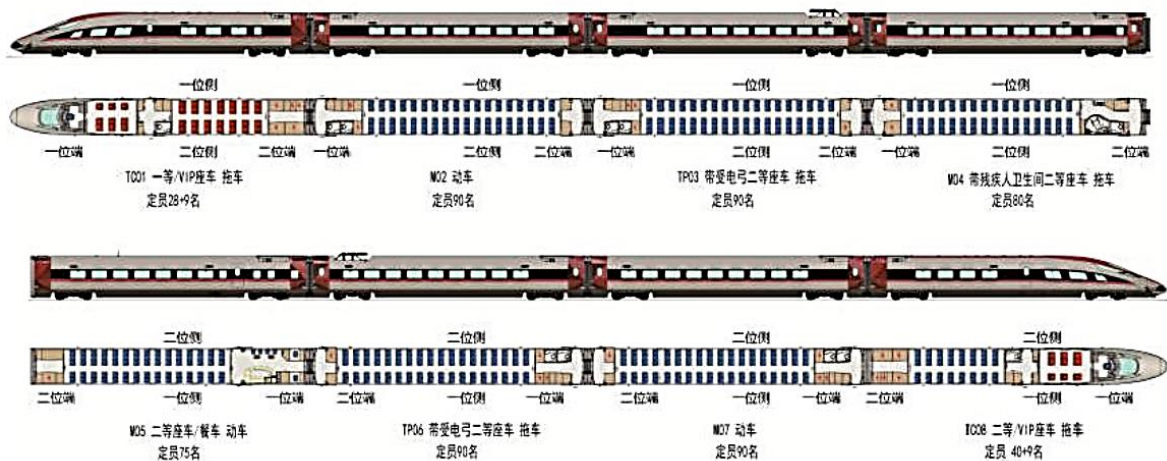
Car No.	Q (kN)	Y (kN)	Y/Q
1	367,423	202,353	0,551
2	359,450	202,353	0,563
3	369,018	202,353	0,548
4	354,532	202,353	0,571
5	363,170	202,353	0,557
6	369,018	202,353	0,548
7	359,450	202,353	0,563
8	365,410	202,353	0,554
Rata-rata	363,436	202,353	0,557

Nilai rasio Y/Q tertinggi terdapat pada Car No. 4 dan terendah pada Car No. 3 dan Car No. 6. Hal ini terjadi karena nilai Q yang berbeda tiap kereta. Salah satu yang mempengaruhi nilai Q adalah jarak titik berat kereta (Pc). Perbandingan antara besar Pc tiap kereta dengan nilai Y/Q yang didapat ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai *derailment* dengan nilai jarak titik berat kereta

Car No.	P_c (mm)	Y/Q
1	1538	0,551
2	1478	0,563
3	1550	0,548
4	1441	0,571
5	1506	0,557
6	1550	0,548
7	1478	0,563
8	1523	0,554

Seluruh data diplotkan ke dalam grafik untuk mengetahui hubungan antara jarak titik berat kereta dengan nilai Y/Q. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.

Gambar 5. Hubungan titik berat dengan *derailment risk*

Dari gambar terlihat bahwa hubungan yang terjadi antara besarnya jarak titik berat kereta dengan hasil analisis risiko anjlokan adalah berbanding terbalik, dimana semakin besar jarak titik berat kereta maka risiko anjlokan semakin kecil, begitu juga sebaliknya. Adanya perbedaan jarak titik berat pada masing-masing kereta padahal masih dalam satu rangkaian kereta dikarenakan desain formasi pada tiap kereta yang berbeda-beda. Perbedaan desain formasi pada masing-masing kereta akan mempengaruhi jumlah kapasitas penumpang, sehingga berpengaruh terhadap berat kereta, berat kereta mempengaruhi jarak titik berat kereta, sehingga walaupun dalam rangkaian yang sama tiap kereta bisa memiliki jarak titik berat yang berbeda-beda. Desain formasi kereta cepat *fuxing train* CR400AF dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Desain formasi kereta cepat *fuxing train* CR400AF
Sumber: *JBHSR EMU Gravity Centre Data*

Analisis *Flange Climbing*
Selain akibat kepala rel yang aus, penyebab terjadinya *derailment* pada kereta adalah *flange climbing*. *Flange climbing* atau naiknya flens roda ke atas kepala rel cenderung terjadi di jari-jari lengkung karena adanya gaya sentripetal dan gaya tangensial pada sarana perkeretaapian, dimana resultan dari kedua gaya menyebabkan terjadinya gaya lateral pada

flens roda ke arah kepala rel yang meningkatkan risiko anjlokan. Hasil analisis *flange climbing* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Analisis *flange climbing* pada kereta

Car No.	N	S	fN	Keterangan
1	184,188	217,012	27,628	Ok
2	180,212	210,106	27,032	Ok
3	184,984	218,393	27,748	Ok
4	177,760	205,848	26,664	Ok
5	182,068	213,329	27,310	Ok
6	184,984	218,393	27,748	Ok
7	180,212	210,106	27,032	Ok
8	183,194	215,286	27,479	Ok
Rata-rata	182,200	213,559	27,330	Ok

Hasil rata-rata menunjukan bahwa gaya normal CR400AF *Fuxing Train* adalah 182,2 kN, gaya tangensial sebesar 213,559 kN, dan fN sebesar 27,330 kN. Hal ini menunjukan bahwa kereta aman dari bahaya *flange climbing* karena nilai fN rata-rata kereta lebih kecil dari gaya tangensialnya.

Analisis *Nadal's Formula*

Sesaat sebelum terjadinya *derailment*, kereta akan mengalami *flange climbing* sehingga kedua analisisnya saling berkaitan. Persamaan yang digunakan pada *Nadal's Formula* juga dipengaruhi oleh sudut flens (β) dan koefisien gesek (μ). Hasil dari analisis nilai Nadal dengan menggunakan koefisien gesek sebesar 0,25 ditampilkan pada Tabel 6.

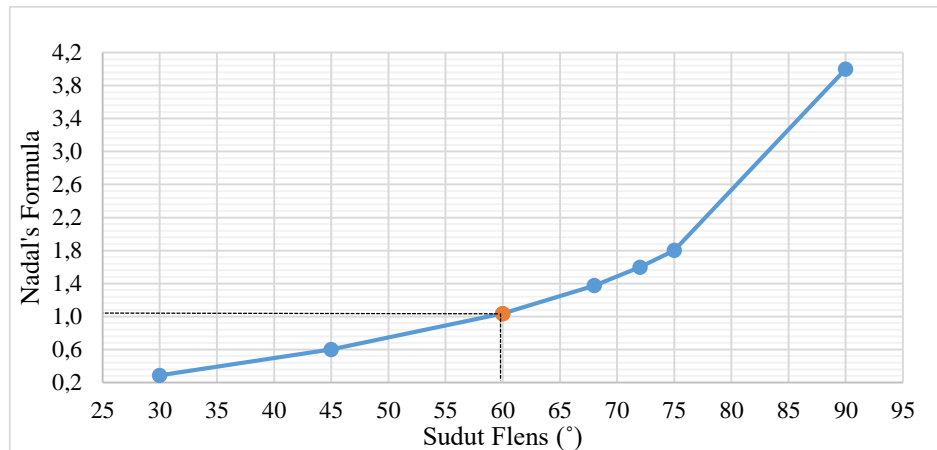
Tabel 6. Nilai koefisien *derailment* dengan variasi sudut flens

Sudut Flens (˚)	Koefisien Gesek (μ)	Koefisien Derailment
30	0,25	0,3
45	0,25	0,6
60	0,25	1,0
68	0,25	1,4
72	0,25	1,6
75	0,25	1,8
90	0,25	4,0

Sudut flens 60˚ adalah standar sudut flens yang diberlakukan di India (Mundrey, 2010). Sudut flens 72˚ adalah sudut referensi yang digunakan kereta CR400AF *fuxing train* pada pembangunan kereta berkecepatan tinggi Jakarta – Bandung, sehingga:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan\beta - \mu}{1 + \mu\tan\beta}$$

0,557 < 1,6…………(OK)

Didapatkan hasil dari nilai *Nadal's Formula* yaitu bahwa Y/Q rasio lebih kecil dari nilai Nadal. Nilai ini memenuhi syarat dimana kereta dapat dinyatakan secara teoritis aman dari risiko *derailment*. Hasil analisis kemudian dimasukan ke dalam grafik yang ditunjukan pada Gambar 7.

Gambar 7. Hubungan nilai nadal dengan variasi sudut flens

Nilai koefisien *derailment* semakin meningkat seiring semakin besarnya sudut flens yang digunakan. Hubungan antara nilai Nadal dengan sudut flens adalah berbanding lurus. Semakin besar nilai sudut flens maka semakin besar nilai koefisien *derailment* yang diperlukan untuk mengakibatkan terjadinya anjlokan.

PENUTUP

Kesimpulan

1. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai *derailment* adalah jarak titik berat, dimana semakin besar jarak titik berat kereta maka risiko anjlokan semakin kecil, begitu juga sebaliknya, semakin kecil jarak titik berat kereta maka risiko anjlokan semakin besar.

2. Gaya normal rata-rata CR400AF *Fuxing Train* adalah 182,2 kN, gaya tangensial sebesar 213,559 kN, dan fN sebesar 27,330 kN. Hal ini menunjukan bahwa kereta aman dari bahaya *flange climbing* karena nilai fN rata-rata kereta lebih kecil dari gaya tangensialnya.

3. Rata-rata beban vertikal 363,436 kN dan gaya lateral sebesar 202,353 kN, didapatkan rata-rata rasio Y/Q yaitu 0,557. Nilai tersebut lebih kecil dari nilai Nadal yaitu 1,6. Hasil analisis menunjukan bahwa kereta api berkecepatan tinggi CR400AF *fuxing train* aman dari risiko *derailment*.

Saran

Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menggunakan variasi lebar rel, radius tikungan, dan variabel lainnya. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai gaya angin dan resultan gaya angin yang disesuaikan dengan kondisi di Indonesia karena hasil yang didapatkan akan mempengaruhi analisis beban vertikal kereta.

DAFTAR PUSTAKA

Atmadja, Sugeng T. dan Fitriadi. 2001. Analisis Keluar Rel Kereta Api. ROTASI – Volume 3 Nomor 1 Januari 2001. Semarang: Universitas Diponegoro.

CSR Qingdao Sifang Co, Ltd. 2018. Overall Technological Scheme. Jakarta-Bandung High Speed Railway Project. Document No. EPC-KCIC-CRRC-002A. China.

Esveld, Coenraad. 2001. Modern Railway Track. MRT-Productions. Netherlands.

Fajriati, Rahmi. et al. 2020. Analisis Standar Perancangan Geometri Rel Kereta Cepat (Studi Kasus: Kereta Cepat Jakarta - Bandung). (e)ISSN 2615-1847 (p)ISSN 2615-1839. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

KNKT. 2018. Laporan Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian Anjlokanan KLB V2/10212 di Emplasemen St. Pauhlima Padang, Divre II Sumatera Barat 25 Oktober 2017. KNKT.17.10.06.02.

Mundrey, J.S. 2010. Railway Track Engineering. Tata McGraw-Hill. New Delhi.

Kementerian Perhubungan. 2012. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.

Prabowo, Firman Adhi. 2017a. Peristiwa Luar Biasa Hebat dan Kejadian Eksternal dalam Penyelenggaraaan Perkeretaapian di Indonesia. Skripsi Sarjana. Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. (Tidak Dipublikasi).

Prabowo, Muwafiqurrahman. 2017b. Perancangan Program Komputer Analisis dan Analisis Derailment. Skripsi Sarjana. Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. (Tidak Dipublikasi).

Sanchez, Sergio A. 2014. *Cross Wind Effect on Railway Infrastructure.* Universidad Politecnica De Madrids. Madrid.

Sulistyawan, Danang. 2013. *Minimising Risk of Train Derailment and Its Consequences in Indonesia.* Tesis Pasca Sarjana. Magister Sistem dan Teknik Transportasi. Universitas Gadjah Mada. (Tidak Dipublikasi).

Susanto, Nur B. dan Muthohar, Imam. 2015. Analisis Distribusi Beban Kereta Api Pada Konstruksi Timbunan Jalur Kereta Api. The 18th FSTPT International Symposium. Unila. Bandar Lampung.